

Estudio sobre la viabilidad de la implementación de criterios medioambientales en la operación de ascenso continuo

Javier A. Pérez-Castán, Rosar Arnaldo Valdés, V.Fernando Gómez Comendador, David Carrera Mate

UPM-GINA, España.

Javier.perez.castan@alumnos.upm.es, rosamaria.arnaldo@upm.es,
fernando.gcomendador@upm.es, dcmate22@gmail.com

Abstract

Objeto: El objetivo de esta investigación es el de analizar las distintas metodologías utilizadas actualmente en la evaluación medioambiental de las operaciones aeronáuticas, particularizando su estudio en las operaciones de ascenso continuo y su integración en una optimización multiobjetivo.

Diseño/metodología/enfoque: Para alcanzar el objetivo anterior es necesario realizar un análisis de las diferentes herramientas que se utilizan en la actualidad evaluando todos los aspectos que sean interesantes y condicionantes para su utilización tanto en operaciones individuales como en un conjunto diario. Posteriormente, la forma en la que se definan estos conceptos medioambientales dentro de una optimización multiobjetivo, en un escenario concreto, determinará su utilización como criterios a optimizar o como restricciones a imponer a lo largo de la trayectoria de ascenso.

Aportaciones y Originalidad: La originalidad de este estudio radica en el análisis de las diferentes metodologías de emisión de ruido y contaminantes con el fin de integrarlas conjuntamente en la evaluación de una operación de ascenso continuo eligiendo las que mejores características presenten.

Limitaciones: El estudio se encuentra en una fase preliminar de la investigación por lo que solamente se ha evaluado cualitativamente las características de las distintas metodologías y su integración en una optimización multiobjetivo, además, tampoco se presentan los resultados de las simulaciones de un ascenso continuo.

Implicaciones prácticas: La selección de una metodología adecuada para la evaluación de ruido y otra para la emisión de contaminantes servirá para realizar un correcto análisis de sus emisiones a lo largo de un ascenso continuo y

facilitará la normalización de los procedimientos a definir durante la fase de ascenso.

Implicaciones sociales: La reducción de emisiones contaminantes y acústicas es un factor primordial en el desarrollo de una aviación más verde y sostenible, siendo éste uno de los objetivos prioritarios de esta investigación.

Valor añadido: La evaluación de las emisiones contaminantes durante la fase de ascenso y su integración en operaciones de ascenso continuo es un tema de actualidad en el que compañías aéreas, operadores, controladores y proveedores de servicios de navegación aérea están muy interesados con el fin de obtener una gestión del tráfico aéreo más eficiente y sostenible.

Palabras clave: Operaciones de ascenso continuo, Crecimiento sostenible, Optimización multicriterio

1. Introducción

Actualmente, el transporte aéreo se corresponde con uno de los medios de transporte más importantes del mundo, ello conlleva a su vez un crecimiento de su impacto sobre el medio que lo rodea. Al producirse este incremento de vuelos en el espacio aéreo no solo ha de tenerse en cuenta la mejora de la seguridad, la eficiencia o la capacidad del transporte aéreo sino que también se debe buscar el crecimiento sostenible. Para ello, resulta necesario disminuir el impacto medioambiental del transporte aéreo que actualmente supone en torno a un 3% del total de los gases de efecto invernadero emitidos en Europa, (SESAR & Environmental-European Commission, 2010). Dicho objetivo se pretende lograr mediante la utilización de nuevas tecnologías (SESAR, 2011) y la introducción de procedimientos más eficientes como Continuous Climb Operations (CCO) and Descent Approximation (CDA).

En 2012, los vuelos de todo el mundo produjeron 689 millones de toneladas de CO₂ (OACI, 2013). Además de estas emisiones a nivel global, las operaciones de las aeronaves en los aeropuertos y sus cercanías afectan a la calidad del aire local a través de los contaminantes emitidos durante las distintas fases de la operación. El segundo factor medioambiental adverso en las proximidades del aeropuerto es el ruido generado por las aeronaves durante el despegue y el aterrizaje. El impacto del ruido puede reducirse debido a que estas emisiones son debidas principalmente a la planta motora y la configuración aerodinámica de la aeronave. Sin embargo, debido a la naturaleza subjetiva del ruido, se han desarrollado distintas herramientas y metodologías, encontrándose soluciones empíricas (Hough & Weir, 1996), lógica fuzzy (Prats et al., 2010) y numéricas (ICAO, 2008).

La investigación sobre la optimización de la trayectoria de una aeronave ha sido ampliamente analizada de acuerdo a diferentes criterios operativos como el consumo de combustible (Jin, Cao & Sun, 2013) y la emisión de ruido (Visser, 2005) y, aunque muchos estudios se han realizado respecto a la implementación de los conceptos medioambientales en las CDAs, poco ha sido investigado en el campo de las CCOs (Mitchell et al., 2012). No obstante, la mayoría de las investigaciones se han centrado en evaluar un único criterio de optimización y muy poca bibliografía se puede encontrar respecto a la optimización multiobjetivo de criterios medioambientales (Visser & Hartjes, 2013).

El objetivo de este trabajo abarca la recopilación y el análisis de diversas metodologías empleadas en la actualidad para el cálculo de las emisiones contaminantes y sonoras de las aeronaves, y su posterior comparación para encontrar aquellas que mejor se adapten al estudio de una operación singular. Además, se analiza la viabilidad sobre la implementación de técnicas de optimización multiobjetivo respecto a los principales criterios medioambientales en una operación de ascenso continuo, presentando y definiendo un escenario de aplicación con las restricciones que se deben tener en cuenta para la aplicación de técnicas de control óptimo.

2. Conceptos medioambientales

La optimización en términos medioambientales de una trayectoria de vuelo parte de un estudio preciso y razonado de combustible, emisiones y ruido, lo que permite hacerse una idea aproximada de la mejor elección a la hora de escoger una trayectoria en base a altitudes, consumo de combustible, configuración de la aeronave e incluso factores meteorológicos.

2.1 Consumo de combustible

Desde los años 70 con el efecto de las crisis petrolíferas se ha trabajado para conseguir una menor dependencia de los combustibles fósiles en el ámbito aeronáutico. Esta dependencia es uno de los factores claves a la hora de realizar un vuelo, puesto que cerca de la mitad de los costes de operación son debidos al precio del combustible. Actualmente se han llevado a cabo gran cantidad de esfuerzos en múltiples proyectos internacionales hasta lograr mejorar un 70% la eficiencia energética de los reactores en los últimos 50 años. El principal modelo de negocio está basado en la reducción del consumo de combustible de modo que en la realización de una operación aérea se consuma el mínimo combustible posible. Este objetivo adquiere mayor relevancia al internarnos en el concepto 4DT (posición + tiempo) en el cual las compañías aéreas dispondrán de una información plena de la trayectoria a realizar ajustando los márgenes a las previsiones. El concepto operativo se define como:

$$flujo\ fuel = f(Consumo_{fuel}) * Empuje \quad (1)$$

$$Consumo_{fuel} = g(Velocidad) \quad (2)$$

2.2 Emisión de contaminantes

Las emisiones pueden clasificarse en globales o locales, se consideran emisiones globales aquellos gases y partículas emitidos directamente en la alta troposfera o baja estratosfera y que tienen repercusión sobre la composición atmosférica, CO₂, NO_x, etc. Además de estas emisiones a nivel global, las operaciones de las aeronaves en los aeropuertos y sus cercanías afectan a la calidad del aire local a través de los contaminantes emitidos durante las distintas fases de la operación: el aterrizaje, el despegue, la rodadura, el almacenamiento de combustible, las pruebas de motores, el uso de APUs, etc. Entre ellas se incluyen óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos (HC) y diferentes humos y partículas en suspensión. Los gases NO_x cuentan con dos efectos indirectos contradictorios sobre el clima: inducen

la producción del ozono bajo la influencia de la luz solar y reducen la concentración atmosférica de metano.

Los fabricantes han realizado diversos estudios para determinar las emisiones producidas por la gran mayoría de los motores disponibles en la actualidad, una vez que han sido admitidos estos ensayos por la autoridad pertinente y su posterior publicación por parte de la OACI (ICAO, 2015) En la gran mayoría de los casos la emisión de los contaminantes son considerados como un factor de emisión respecto del flujo de combustible:

$$\text{Emisión (g)} = \text{Fuel quemado (kg)} \times \text{Factor de emisión (g/kg fuel quemado)} \quad (3)$$

2.3 Emisión de ruido

El ruido se puede definir como toda clase de sonido no deseado, molesto y que pueda ser medido con precisión. No obstante, la naturaleza subjetiva y altamente compleja del ruido está implícita en su propia medición y más aún en el caso de las cercanías de un aeropuerto. La metodología más utilizada para la medición del ruido está basada en las denominadas huellas de ruido, Figura 1, las cuales muestran el impacto del ruido en las comunidades cercanas al aeropuerto y ofrece información sobre cómo variables operativas (configuración del avión, procedimiento de vuelo o nuevas tecnologías) afectan al tamaño y a la forma de la huella.

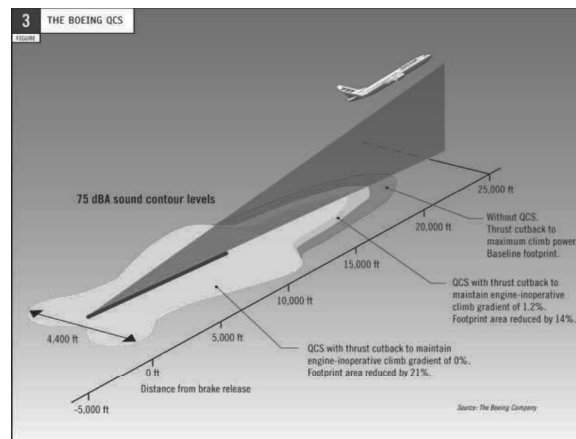


Figura 1. Representación huella acústica en un despegue (BOEING, 2003)

El ruido que genera una aeronave al despegar depende de distintas variables, configuración de la aeronave, tipo de aeronave, distancia entre el emisor y el

receptor y su ángulo y la potencia del motor. Los principales modelos no proporcionan resultados individuales si no unos niveles promedio por día, para calcular el nivel de presión sonora se divide la trayectoria en varios segmentos en función de la malla en la que se quiere evaluar el ruido, mediante cálculos matemáticos se obtiene la energía de exposición sonora para cada segmento y a partir de todos los segmentos el de cada vuelo.

3. Análisis comparativo de la metodología existente

En este trabajo se ha realizado una recopilación de diferentes metodologías y modelos empleados en el cálculo tanto de emisiones contaminantes como acústicas, utilizados por diferentes entidades mundiales para sus estudios y proyectos. Para las más destacables de las metodologías de cada ámbito se muestran sus características principales, su facilidad de uso, los algoritmos empleados, su precisión, etc., con el objetivo de recaudar información suficiente para realizar una comparación razonada y obtener así unas conclusiones de qué método o métodos resultan más apropiados de ser utilizados según los requisitos para un estudio en particular.

3.1 Herramientas para evaluar la emisión de contaminantes

	Base de datos (OACI)	Base de datos EMD (FAA)	EMTM Australia (NEPC)	Estudio en Viena (Wiener Gasse 146)	BOEING Method 2 (BOEING)	Intergovernmental Panel on Climate Change (EEA)		
						NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Tipo de motor /aeronave	SI /NO	CIENTOS DE COMBINACIONES	SI /SI	35 COMBINACIONES	NO/NO	NO/SI	NO/SI	NO/SI
Consumo de combustible	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Uso de factores de emisión	SI	SI	SÍ	SÍ	SÍ	SI	SI	SI
Distinción fases LTO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Nº motores	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO
Parámetros del motor (empuje, velocidad del rotor...)	SI	-	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Emisiones de CO ₂ /NO _x /SO _x	SI/SI/NO	SI/SI/SI	NO/SI/SI	SI/SI/SI	NO/SI/NO	SI/SI/SI	SI/SI/SI	SI/SI/SI
Emisiones de “humo de carbón”	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Precisión del método	MEDIA	MEDIA	MEDIA/BAJA	BAJA	MEDIA/ALTA	BAJA	MEDIA	ALTA

Tabla 1. Análisis de las características de las diferentes herramientas existentes para evaluar las emisiones

3.2 Herramientas para evaluar la emisión de ruido

	INM (FAA)	ECAC.CEAC Doc 29 ()	IMMI (Grupo Wölfel)	AEM (FAA)	ANOPP (NASA)	NNI (CAA)	NEF (FAA)
Tipo de modelo	Gráfico y numérico	Gráfico y numérico	Gráfico	Gráfico	Numérico	Numérico	Numérico
Operaciones diurnas/nocturnas	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO	SÍ
Tipo aeronave/motor	SÍ/NO	SÍ/NO	SÍ/NO	SÍ/NO	NO/SI	NO/SI	NO/NO
Operación singular	NO	SÍ	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Algoritmia de optimización propia	SÍ	SÍ	NO	NO/SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Basado en ley de exposición de ruido	SÍ	NO	NO	SÍ	NO	NO	NO
Ecuaciones conocidas	SÍ	SÍ	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Máxima altitud aproximaciones / llegadas	6000 ft /10000 ft	6000 ft /10000 ft	6000 ft /10000 ft	3000 ft	NO DEFINIDAS (ESTIMACIONES)		
Uso en la optimización de una trayectoria	POSIBLE	POSIBLE	NO POSIBLE	NO POSIBLE	NO RECOMENDABL E	POSIBLE, PERO INSUFICIENTE	POSIBLE, PERO INSUFICIENTE
Precisión	MEDIA	MEDIA /ALTA	BAJA /MEDIA	MEDIA	ALTA	MEDIA	MEDIA

Tabla 2. Análisis de las características de las diferentes herramientas existentes para evaluar el ruido

4. Impacto en la optimización multiobjetivo

El análisis del impacto de la optimización de las trayectorias de aeronaves de acuerdo a un único criterio medioambiental ya ha sido múltiples veces realizado y con resultados satisfactorios. El siguiente paso es obtener una trayectoria que posibilite la elección de una senda que responda a la optimización de diversos criterios simultáneamente, sin embargo, la enorme diferencia entre los criterios a considerar por las compañías inhibe la posibilidad de introducir libremente factores operativos y medioambientales.

4.1 Definición del escenario

Debido al fuerte incremento del tráfico aéreo en todo el mundo, se han desarrollado procedimientos de salida y de llegadas ineficientes desde el punto de vista operativo, pero muy necesarios para asegurar un tráfico ordenado y con los mínimos riesgos de sufrir un accidente. En la última década se han realizado proyectos para estudiar la viabilidad de la implementación de CDAs en los aeropuertos y, en los últimos años, de los CCOs, dentro de este último se encuentra englobado este proyecto.

Las fases de despegue y ascenso son las más complejas y peligrosas por lo que se encuentran altamente restringidas. Estas limitaciones provienen de los distintos agentes involucrados:

- Fabricante: En la fase de despegue restringe las características operativas de las aeronaves en los distintos segmentos a realizar.
- Diseño de procedimientos: Cada salida de un aeropuerto puede estar limitada por distintos factores que limitan el gradiente de subida o la velocidad, montañas, edificios, vientos, etc.
- Control de tráfico aéreo: Al encargarse de la operación en tiempo real tienen en cuenta potenciales conflictos con otros tráficos circundantes, por lo que son ellos los que determinan si se debe realizar nivelaciones y a qué altura.

La implementación de una CCO significaría la eliminación de estas nivelaciones y que cada aeronave alcanzase su altitud de crucero de acuerdo al criterio operativo preferente por cada compañía aérea. No obstante, esto también tiene otros aspectos negativos como una mayor incertidumbre en la planificación de las, una disminución de la capacidad aeroportuaria y del espacio aéreo para garantizar la suficiente seguridad operacional entre otras.

4.2 Optimización multiobjetivo

La optimización multiobjetivo busca obtener la mejor solución evaluando distintos factores y considerando una interacción entre ellos, siendo un procedimiento utilizado habitualmente y muy complejo debido a la naturaleza no continua. El objetivo de este apartado no es el de definir una metodología para el problema de las CCOs, si no de analizar la integración de los distintos criterios medioambientales en ella.

El principal problema de la optimización multicriterio es que en muchos casos resulta imposible valorar adecuadamente factores de distinta naturaleza, por ejemplo como puede ser el caso en el que se busca minimizar la emisión de ruido de las operaciones aeroportuarias y el tiempo entre operaciones: como el ruido depende de la potencia motora se buscará minimizarla dentro de unos rangos admisibles, pero por el otro lado, para minimizar el tiempo entre operaciones las aeronaves deben dejar la trayectoria en común lo más rápidamente posible lo cual supone operar con restricciones a la velocidad.

En el caso de introducir la emisión de contaminantes como factor, se debe considerar que es un factor de emisión respecto al consumo de combustible a lo largo de la trayectoria. Cómo este factor de emisión se considera constante a lo largo del ascenso, la optimización deriva en la optimización del consumo de combustible. Por otro lado, debido a normativas cada vez más restrictivas, la

emisión de contaminantes se recomienda considerarla como una restricción de la función multiobjetivo:

$$Emisión(g) \leq R_{emisión}(g) \quad (4)$$

$$R_{emisión}(g) = R_{fuel}(kg) \times Factor\ de\ emisión\ (g/kg\ fuel\ quemado) \quad (5)$$

Si una aeronave realiza un despegue por una salida normalizada, como ocurre en la mayoría de los escenarios de alta densidad, los factores como la configuración de la aeronave y la distancia al emisor se encuentran restringidos por los procedimientos a cumplimentar, por lo cual, para optimizar el ruido, se debe minimizar el empuje del motor. Además, si se quiere introducir el ruido como variable dentro de un proceso de optimización multicriterio se debe tener en cuenta la complejidad del análisis de ruido en tiempo real así como que la normativa no está dirigida individualmente a cada despegue si no al conjunto diario. Por estos motivos se considera que introducir el ruido como factor dentro de una función multiobjetivo no resultaría adecuado, aunque sí que se debería considerar el ruido como una restricción a imponer durante el proceso de optimización:

$$R_{ruido}(65\ dB) \rightarrow Empuje(65\ dB) \quad (6)$$

Lo que significa una restricción al empuje para cada salida normalizada, simplificando el proceso de optimización y asegurando el cumplimiento de la normativa de ruido en cada aeropuerto.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un análisis de las capacidades de diferentes metodologías y modelos empleados en el cálculo tanto de emisiones contaminantes como acústicas utilizados por diferentes entidades mundiales. Centrándose en el estudio de las emisiones contaminantes emitidas en una operación CCO, existen varias opciones válidas a la hora de escoger metodología; sin embargo, se puede considerar el Boeing Method 2 como uno de los más adecuados debido a su relación precisión-disponibilidad de datos. Además, su no dependencia de ninguna base de datos y su validez para todas y cada una de las fases de vuelo (incluido crucero) hacen que su disponibilidad y utilidad sea total en todo momento. Su único inconveniente reside en el cálculo de emisiones de CO₂, para el cual habría que recurrir al método establecido por

OACI al no existir datos específicos de factores de emisión del mismo. En el caso de emisiones acústicas, la variedad de modelos también es muy elevada, aunque la mayoría de ellos no permiten realizar un cálculo específico para una operación en concreto. Por lo tanto, la recomendación final remarca el uso de uno de los dos grandes software INM o ECAC.CEAC, el resto de modelos quedan descartados por razones como complejidad o indeterminación en los márgenes de medida. Por último, se recomienda considerar la emisión de contaminantes como una restricción y no como un factor a optimizar puesto que al ser función del combustible consumido estaría duplicándose este criterio, por otro lado, la emisión de ruido se puede considerar un criterio a optimizar pero su complejidad numérica de análisis desaconseja su utilización en un proceso de optimización en tiempo real.

6. Agradecimientos

Este proyecto ha sido desarrollado bajo el Plan estatal de Innovación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad “Procedimientos de despegue y ascenso para un transporte aéreo más inteligente, sostenible e integrado”.

7. Referencias

- BOEING (2003). *Quiet Climb*. Technology/Product Development, AERO.
- Hough, J.H., Weir, D.S. (1996). *Aircraft Noise Prediction program (ANOPP) Fan Noise Prediction for Small Engines*. NASA Langley Research Centre, AlliedSignal Engines.
- ICAO (2008). *Recommended method for computing noise contours around airports*. Doc 9911. 1st edition, Montréal, Canada.
- ICAO (2015). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*. <http://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
- Jin, L., Cao, Y., Sun, D. (2013). Investigation of Potential Fuel Savings Due to Continuous-Descent Approach. *J. of Aircraft*, 50(3), 807-815.
- Mitchell, D., Ekstrand, H., Prats, X., Grönstedt, T. (2012). An environmental assessment of air traffic speed constraints in the departure phase of flight: A case study at Gothenburg Landvetter Airport, Sweden. *Transportation Research Part D*, 17, 610-618.
- OACI (2013). *Medidas relativas a la emisión de CO2 de la aviación*. Comité ejecutivo Asamblea A38-WP/68.

- Prats, X., Puig, V., Quevedo, J., Nejari, F. (2010). Multi-objective optimization for aircraft departure trajectories minimising noise annoyance. *Transportation Research Part C*, 18, 975-989.
- SESAR J.U. (2011). *Lot 2-Terminal –Down wind optimization- Final report*. Direction des Services de la Navigation Aérienne.
- SESAR J.U., Environment-European Commission (2010). *SESAR and the Environment*.
- Visser, H.G. (2005). Generic and site-specific criteria in the optimization of noise abatement trajectories. *Transportation Research Part D*, 10, 405-419.
- Visser, H.G., Hartjes, S. (2013). Economic and environmental optimization of flight trajectories connecting a city-pair. *Proc IMechE Part G: J. of Aerospace engineering*, 228(6), 980-993.